

基于虚拟功率的非计划性VSG并离网 平滑切换控制策略

丁津津, 彭勃, 张峰, 毛荀

(国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230000)

摘要: 虚拟同步发电机(VSG)离网向并网切换时会形成较大冲击电流, 传统预同步方案在并网使能时可能出现稳定性问题。针对该问题, 提出无锁相环预同步单元在非并网时刻切除的控制方法。首先基于VSG的转子运动方程和励磁方程在内的基本控制结构, 推出VSG合闸瞬间造成大冲击电流的主要影响因素; 在考虑虚拟电抗的物理模型和虚拟功率输出特性的基础上, 制定虚拟电抗和带通滤波相结合的虚拟功率预同步控制方案; 最后, 在2 kW仿真和实验中验证所提方法的有效性。仿真和实验结果表明, 采用该方法可以实现离网与并网的平滑切换, 且预同步单元可在并网后依旧使能的可行性, 展现出良好的稳定性能。

关键词: 虚拟同步发电机; 合闸; 冲击电流; 预同步; 虚拟功率; 虚拟电抗; 平滑切换

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd26516

Control Strategy for Seamless Unplanned Transition Between Grid-connected and Islanded Modes of VSG Based on Virtual Power

DING Jinjin, PENG Bo, ZHANG Feng, MAO Xun

(Electric Power Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd.,
Hefei 230000, Anhui, China)

Abstract: To address the large inrush current during the switching of a virtual synchronous generator (VSG) from off-grid to grid-connected, and the stability issues of traditional pre-synchronization schemes, a control method for the phase-locked loop (PLL) pre-synchronization unit to be cut off in non-grid-connected time was proposed. First, based on the VSG's rotor motion and excitation equations, the main factors affecting the inrush current at closing were identified. Then, considering the physical model of virtual reactance and the characteristics of virtual power output, a virtual power pre-synchronization scheme combining virtual reactance and band-pass filtering was developed. Finally, the effectiveness of proposed method was verified through 2 kW simulations and experiments. Results show that proposed method enables smooth switching between off-grid and grid-connected modes and allows for the removal of the pre-synchronization unit at any time after grid connection, demonstrating good stability.

Key words: virtual synchronous generator (VSG); closing; inrush current; pre-synchronization; virtual power; virtual reactance; smooth transition

在能源危机和环境保护的双重压力下, 人类迫切需要加大地球上可再生能源的发展, 提高可再生能源的利用率。随着能源危机和环境污染问题的日益突出, 大量电力电子变换器的应用使整个电力系统呈现出低惯量的特点^[1-2]。为了解决这个问题, 虚拟同步发电机(VSG)通过模拟同步发电机的特性来提高新能源对电网频率和电

压的支撑能力^[3-5], 基于VSG控制的多重优势, 其在新能源并网中得到广泛应用^[6-9]。

当VSG从并网切换到离网运行时, VSG的有功频率会根据负载自动调整频率。此时不存在因相位不一致导致从并网切换到孤岛的冲击电流问题, 因此可以直接从并网切换到离网。当VSG从离网切换到并网运行时, 类似传统的同步

基金项目: 国网安徽省电力有限公司科技项目(B3120523000G)

作者简介: 丁津津(1985—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为智能电网、继电保护和新能源等, Email: 411576252@qq.com

发电机,在并网过程中的功率波动和电压电流冲击难以有效消除。针对以上问题,文献[10]提出了一种基于单锁相环(phase-locked loop, PLL)的预同步单元,VSG输出电压以角速度 ω 旋转,电网电压矢量以角速度 ω_0 旋转,若能调节VSG输出电压的旋转速度,使其与电网电压重合,即可实现VSG与电网之间电压的同步,进而实现离/并网模式的平滑切换。但这种控制方式实际是电网电压相角与逆变器桥臂电压相角一致,未考虑LC滤波器的影响,导致并网点电压与电网电压存在相位差,并网时容易出现冲击电流。考虑到LC滤波器的影响,文献[11]使用双PLL的预同步单元,相角控制环节PI调节器的输入为电网电压相角与逆变器并网点电压相角之差,而非电网电压相角与逆变器桥臂电压相角之差,因此可以控制逆变器的输出电压相角与电网电压相角相同。

有学者提出基于虚拟阻抗的控制环路,替代锁相环以实现从离网到并网模式的平滑切换^[12-16]。例如文献[12]利用虚拟阻抗计算虚拟功率,在电网电压与并网点电压相同的前提下,保证了相位同步。钟庆昌教授提出的虚拟电流预同步方案^[13],通过将并网点电压与电网电压作差,利用一个虚拟电阻产生虚拟电流,进行相位同步。然而,上述无锁相环控制方案中,受原理限制,保持VSG输出电压的幅度与电网电压幅度完全相同是平滑切换的前提条件,并网条件要求苛刻,且目前的预同步方案中,使用若干PI控制器实现相位同步,且必须在并网瞬间及时切除预同步单元,否则并网期间预同步单元的输出值叠加在VSG的输出频率中,存在功率失控风险。

为了提高并/离网切换的稳定性,本文对预同步方案进行改进,设计一种虚拟功率预同步的控制策略,无需锁相环、PI控制模块和额外的电压幅值同步模块即可实现并/离网切换的平滑过渡,且该控制策略不影响正常并网运行,无需在并网瞬间切除预同步单元,因此在非计划运行并/离网切换时,本文方案满足平滑切换的同时,也不会影响正常并网运行,在仿真和实验中验证了所提策略的有效性。

1 VSG的拓扑和控制方案

VSG的主电路拓扑和控制方案如图1所示。在图1a中, V_{dc} 为VSG的直流侧电压,可以看作是一个常数; u_g 为电网的交流侧电压; v_a, v_b, v_c 为VSG

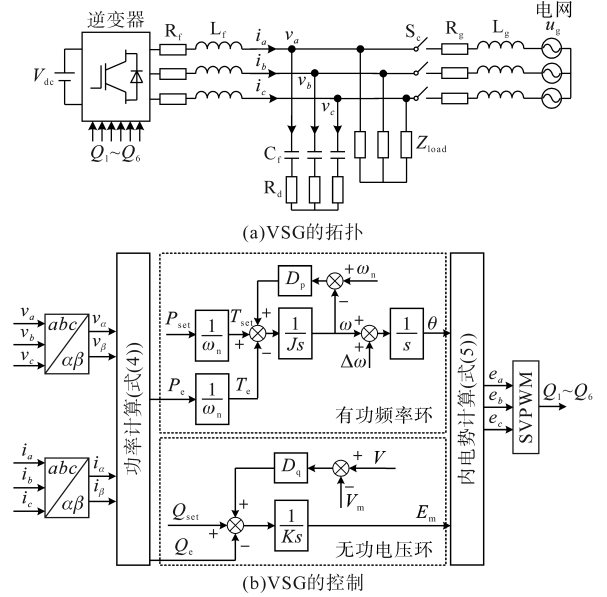


图1 VSG的拓扑和控制方案

Fig.1 Topology and control scheme of the VSG

的输出端电压; i_a, i_b, i_c 为VSG的输出电流; L_f, R_f, C_f, R_d 分别为滤波电感、滤波电感上寄生电阻、滤波电容、滤波电容上寄生电阻; L_g, R_g 分别为网侧等效电感和电阻; Z_{load} 为离网期间携带的负荷; S_c 为并/离网的切换开关。

VSG的功率控制方案如图1b所示, T_{set} 和 T_e 分别为转矩参考和电磁转矩。有功频率控制模拟同步发电机的惯量和一次调频特性,无功电压控制模拟同步发电机的电压调节特性。VSG的有功和无功功率控制器的数学方程可以表示如下式:

$$\frac{P_{set}}{\omega_n} + (\omega_n - \omega) D_p - \frac{P_e}{\omega_n} = J s \omega \quad (1)$$

$$Q_{set} - Q_e + D_q (V - V_m) = K s E_m \quad (2)$$

$$\theta = \frac{1}{s} (\omega + \Delta\omega) \quad (3)$$

式中: J 为虚拟惯量; ω, ω_n 分别为VSG的输出角频率和额定角频率; $\Delta\omega$ 为在离网期间预同步控制下输出的频率补偿值; P_{set}, Q_{set} 分别为有功功率和无功功率参考; P_e, Q_e 分别为瞬时有功功率和无功功率; D_p, D_q 分别为频率下降系数和电压下降系数; V, V_m 分别为VSG端电压的幅值和其额定幅值参考; K 为无功电压回路的惯性系数; θ, E_m 分别为VSG的相位角和内电势幅值输出。

输出有功功率和无功功率可根据瞬时功率计算:

$$\begin{cases} P_e = 1.5(v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) \\ Q_e = 1.5(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \end{cases} \quad (4)$$

式中: v_α, v_β 分别为VSG在 α - β 参考系中的输出端电压的 α, β 轴分量; i_α, i_β 分别为VSG在 α - β 参考系中的输出电流的 α, β 轴分量。

内电势由有功频率环和无功电压环决定,表达式如下:

$$\begin{cases} e_a = E_m \cos \theta \\ e_b = E_m \cos(\theta - 2\pi/3) \\ e_c = E_m \cos(\theta + 2\pi/3) \end{cases} \quad (5)$$

式中: e_a, e_b, e_c 为VSG的三相内电势。

VSG从离网状态平稳切换到并网状态的前提是VSG在离网运行时产生的电压相位与电网的电压相位一致。

离网下VSG输出和电网的A相电压分别为 v_a 和 $u_{g,a}$,分别表示为

$$\begin{cases} v_a = V \sin(\omega t + \theta) \\ u_{g,a} = U_g \sin(\omega_g t + \theta_g) \end{cases} \quad (6)$$

式中: V, U_g 分别为VSG的输出电压和电网的电压幅值; ω_g 为电网角频率; θ, θ_g 分别为VSG和电网输出电压的相角。

合闸瞬间,VSG与电网之间的电压差为

$$\Delta u = V \sin(\omega t + \theta) - U_g \sin(\omega_g t + \theta_g) \quad (7)$$

一般来说,VSG的输出电压幅值 V 接近电网电压幅值 U_g ,即 $V \approx U_g = U$ 。因此电压差为

$$\Delta u = 2U \sin \frac{(\omega - \omega_g)t + (\theta - \theta_g)}{2} \times \cos \frac{(\omega + \omega_g)t + (\theta + \theta_g)}{2} \quad (8)$$

并网瞬间的冲击电流为

$$\Delta i_a = \Delta u / Z_g \quad (9)$$

式中: Z_g 为电网阻抗。

式(8)中最大电压偏差达到 $2U$,即 $\Delta u_{\max} = 2U$ 。可见,并网瞬间的冲击电流主要来自于VSG输出与电网之间的相位偏差。当未进行预同步, S_c 直接闭合时,由于电网阻抗 Z_g 非常小,容易产生冲击电流,危及设备和人身安全。

2 虚拟功率预同步控制

预同步控制方案的目的是消除VSG处于离网运行模式时VSG输出电压相位与电网电压之间的相位差,从而避免从离网切换到并网时产生的冲击电流。其中,电网电压信息可以尝试通过采样或通信等方式获取。

图2为虚拟功率预同步的原理模型。其中,公共耦合点(PCC)处VSG的输出电压可以用矢

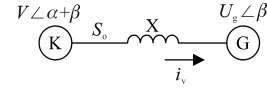


图2 虚拟功率预同步模型

Fig.2 Virtual power pre-synchronization model

量法表示为 $V\angle\alpha+\beta$,电网电压为 $U_g\angle\beta$;X为虚拟电抗;虚拟电流 i_v 是流经虚拟电抗X的电流,可以表示为

$$i_v = \frac{V\angle(\alpha + \beta) - U_g\angle\beta}{jX} \quad (10)$$

三相虚拟功率 P_{virtual} 可以表示为

$$P_{\text{virtual}} = \frac{3VU_g}{2X} \sin\alpha \quad (11)$$

当VSG的输出电压相位与电网电压的相位差逐渐缩小时, $\sin\alpha$ 越来越接近0,即输出虚拟功率 P_{virtual} 逐渐接近0。因此,虚拟功率可以作为VSG有功频率环的频率补偿,实现离网模式切换到并网模式时电流的平滑过渡。其次, P_{virtual} 为直流量,在并网后自动为0,可以直接补偿进VSG有功频率环中,因此可去除预同步控制中的PI调节环节,且不会对逆变器的并网运行产生不良影响。

此外,式(10)的虚拟电流可以用虚拟电抗和端电压表示为

$$\begin{cases} i_{v,a} = \frac{v_a - u_{g,a}}{sX} \frac{\omega_1 s}{s^2 + (\omega_1 + \omega_2)s + \omega_1 \omega_2} \\ i_{v,b} = \frac{v_b - u_{g,b}}{sX} \frac{\omega_1 s}{s^2 + (\omega_1 + \omega_2)s + \omega_1 \omega_2} \\ i_{v,c} = \frac{v_c - u_{g,c}}{sX} \frac{\omega_1 s}{s^2 + (\omega_1 + \omega_2)s + \omega_1 \omega_2} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $u_{g,a}, u_{g,b}, u_{g,c}$ 为电网相电压。

在式(12)中加入的带通滤波器的高、低截止频率 ω_1, ω_2 在VSG额定工作频率 ω_n 附近,目的是:一方面可以滤除来自电网侧的高、低次谐波的影响,另一方面可以滤除虚拟电流中的直流分量,该直流分量是由于VSG的输出电压幅值 V 与电网电压幅值 U_g 并非完全一致,因此经过一个虚拟电抗之后存在一个取决于逆变器端口电压与电网电位的幅值与虚拟电抗值大小的直流分量。

虚拟功率预同步控制的结构如图3所示,其中虚拟功率可以表示为

$$P_{\text{virtual}} = \frac{3VU_g}{2X} \sin\alpha = i_{v,a} v_a + i_{v,b} v_b + i_{v,c} v_c \quad (13)$$

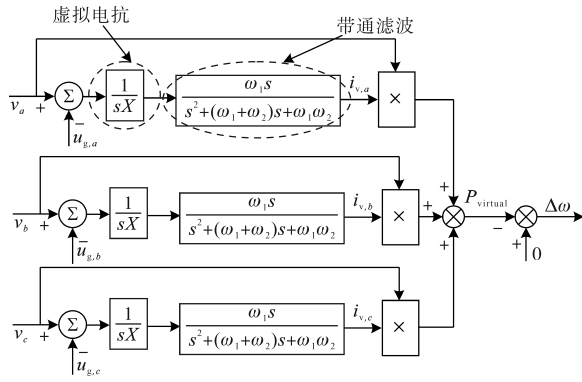


图3 虚拟功率预同步控制

Fig.3 Virtual power pre-synchronization control.

3 仿真实验验证和结果分析

3.1 仿真验证及分析

为了验证上述理论分析,根据图1和表1所示的结构和参数,在Simulink中构建了一个仿真模型。其中, f_s 为开关频率, f_1 为电网电压频率,虚拟电抗 X 取 $1\ \Omega$ 。带通滤波器的高、低截止频率 ω_1 和 ω_2 接近额定VSG工作频率 ω_n ,分别取 $\omega_1=320\ \text{rad/s}$ 和 $\omega_2=308\ \text{rad/s}$ 。

表1 VSG仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of VSG

参数	值	参数	值
V_{dc}	350 V	P_{set}	2 kW
V_n	155.6 V	Q_{set}	0.1 kvar
L_f	2 mH	D_p	2.53
R_f	0.1 Ω	D_q	194
C_f	15 μF	K	3.09
R_d	0.1 Ω	J	0.003
L_g	6 mH	f_1	50 Hz
R_g	0.2 Ω	f_s	10 kHz

若不进行预同步,直接由离网切换至并网,在一次调频下VSG输出电压与网侧电压频率存在固定差额,导致二者相位误差随着时间累积,强行并网会由于相位误差对电网造成巨大冲击。按照本文并网方式进行预同步,设置有功指令值 $P_{ref}=2\ \text{kW}$,无功指令值 $Q_{ref}=0.1\ \text{kvar}$,功率因数 $\cos\varphi=0.995$,满足要求(本地有功负荷1 kW、无功负荷0.1 kvar)。

图4为进行预同步的电压仿真波形, $t=0.3\ \text{s}$ 时虚拟功率预同步单元使能,之后始终处于运行状态。预同步使能后,两电压间的频率误差逐渐缩小; $t=0.5\ \text{s}$ 时相角误差达到所允许的并网条件,离网向并网平滑过渡,保证了分布式电源对电网的高质量供电。

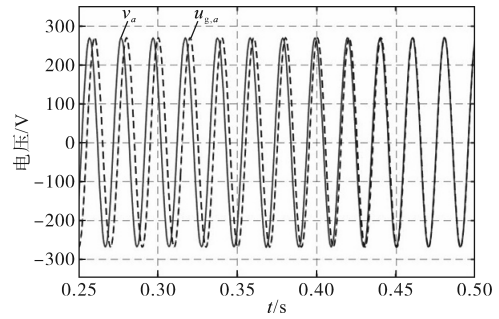


图4 带载并网电压

Fig.4 Grid-connected voltage under load

使用PI控制器的预同步单元,若在并网时使能,会导致VSG失控。其根本原因在于,在并网阶段存在相位差 $\Delta\theta$,经过PI控制后导致预同步控制输出的频率补偿值 $\Delta\omega$ 继续累积。即便相位差 $\Delta\theta$ 重新调节到0进入新稳态,由于PI积分未重置, $\Delta\omega$ 始终按照最大偏差输出。进一步地,在VSG有功频率环中 $\theta=(\omega+\Delta\omega)/s$,并网阶段VSG输出频率在预同步单元作用下与电网频率相同,即 $\omega+\Delta\omega=\omega_g$,此时 $\omega_g=\omega_n$;在新稳态中,VSG的有功频率环满足:

$$P_e = P_{set} + (\omega_n - \omega)D_p\omega_n = P_{set} + \Delta\omega D_p\omega_n \quad (14)$$

因此使用PI控制器的预同步单元,若在并网时使能,由于 $\Delta\omega$ 达到最大值,会导致实际输出功率偏离设定值,存在功率失控风险。

图5为本文方案预同步控制部分的误差变化波形,分别为VSG输出电压与网侧电压的相角差 $|\Delta\theta|$ 和虚拟预同步输出的频率补偿 $|\Delta\omega|$ 。在 $0\ \text{s}$ — $0.3\ \text{s}$ 由于存在1 kW有功负荷,根据有功频率环: $(P_{ref}-P_e)/\omega_n=(\omega-\omega_n)D_p$,此时频率差 $\Delta\omega$ 可计算为 $1.26\ \text{rad/s}$;由于存在固定的频率差,经过积分累积,VSG输出电压与网侧电压的相角差逐渐增加,在 $0.3\ \text{s}$ 时相角差达到 63° 。在此相角差之下,计算虚拟功率输出补偿初值为54 W,在补偿后VSG输出电压与网侧电压的相角差逐渐减小,在 $0.48\ \text{s}$ 时相角差为0,延时一个电网周期后并网开关闭合。在 $0.5\ \text{s}$ 后的并网阶段,本文方案的频率补偿 $|\Delta\omega|$ 自动为0,根据式(14)有 $P_e=P_{set}$,因此本文预同步方案在并网阶段使能时,依旧不影响并网运行。

图6为VSG并/离网切换的仿真波形,在全范围运行时,本地负荷为有功负荷1 kW、无功负荷0.1 kvar。在 $0\ \text{s}$ — $0.5\ \text{s}$ 时间段为离网状态,第 $0.5\ \text{s}$ 时刻由离网切换至并网, $0.5\ \text{s}$ — $2\ \text{s}$ 为并网时间段,第 $2\ \text{s}$ 时刻由并网退至离网, $2\ \text{s}$ — $2.5\ \text{s}$ 为离网

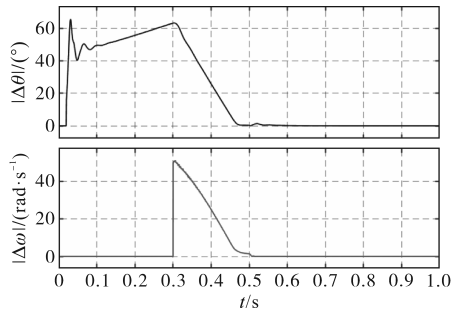
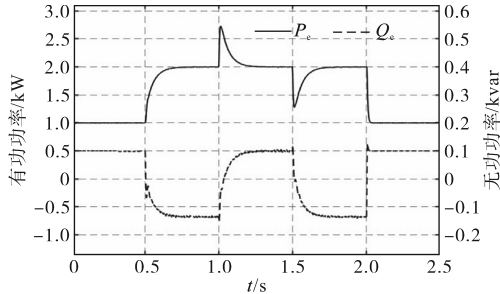
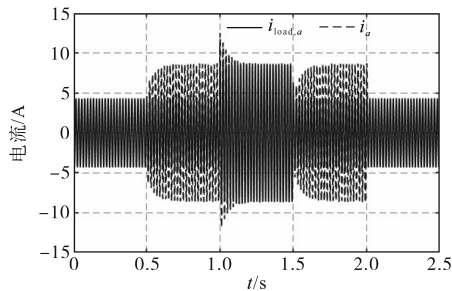


图5 预同步控制的误差变化波形

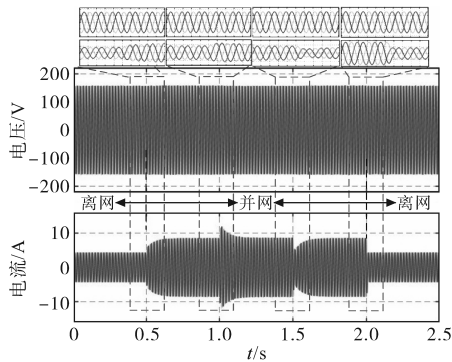
Fig.5 Error variation waveforms of pre-synchronization control



(a)VSG输出功率



(b)负荷变化时输出电流



(c)全切换范围的VSG的电压、电流

图6 VSG并/离网切换的输出波形

Fig.6 Output waveforms of VSG during grid-connected and off-grid switching

时间段。在0.5 s—2 s的并网时间段中,第1 s时突加1 kW的负荷,1.5 s时退出1 kW的负荷。

图6a为全运行范围VSG输出有功和无功功率波形。显然,在第0.5 s和2 s时刻离网向并网相互切换中有功和无功功率平滑过渡。从0.5 s时刻并网开始,在0.2 s内输出电流逐渐增加,功率平缓达到指令值,并稳定运行,其中由于线路

阻抗原因,导致实际无功与无功指令值存在差异。而在并网的第1 s时突加负荷和第1.5 s时突减负荷时,存在有功波动,有功增量与系统运行状态和线路电抗相关。

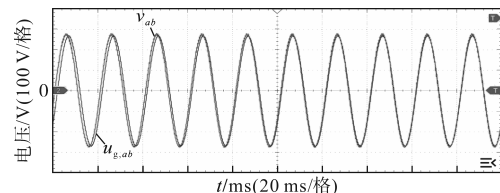
图6b为VSG输出的A相电流 i_a 和负荷上电流 $i_{load,a}$, $t=1$ s突加1 kW负荷时,负荷电流幅值从4.28 A增加到8.56 A,VSG实际有功增加,在有功环调节下,VSG输出功率快速恢复到指令值;同理,在 $t=1.5$ s突减负荷时,负荷电流幅值降低至4.28 A,有功突减,在有功环调节下最终稳定值与指令值一致。其中,在1 s—1.5 s期间VSG输出功率全部提供给负荷,变流器与电网交互减弱,此时实际输出无功与指令值一致。 $t=2$ s并网开关断开后,按照VSG自建电压离网运行。

图6c为全切换范围的VSG的三相电压和电流波形,可以看出,在离网和并网的相互切换中,VSG输出电流平滑过渡,无冲击电流产生。

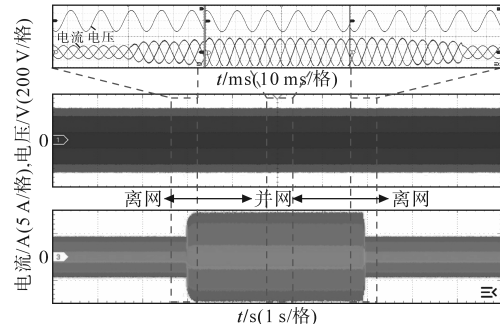
仿真结果表明,在VSG的并/离网过程中,本文提出方案在第0.3 s预同步单元启动,之后始终使能,使并/离网平滑切换,且不影响并网过程中负荷突变时VSG的有功调节功能。

3.2 实验验证及分析

按照降额平台参数设计,在2 kW小功率平台上进行虚拟功率预同步控制策略的实验验证,参数设置见表1。预同步控制的目的是消除VSG由离网切换至并网时的电流冲击。图7为增加虚拟功率预同步控制时的实验波形。其中,图7a是



(a)预同步期间电网电压与PCC电压



(b)离网与并网相互切换波形

图7 VSG在并网和离网条件下的实验波形

Fig.7 Simulation waveforms of VSG grid-connected and off-grid switching

离网时虚拟功率预同步单元使能后的实验波形,在虚拟功率预同步控制下VSG输出电压 v_{ab} 相位快速追踪电网电压 $u_{g,ab}$ 相位,并保持一致,因此在图7b中实现离网模式平滑切换至并网运行。仿真和实验结果一致,且按照设定运行,满足预期目标。

4 结论

本文从原理出发,简化控制结构,无需锁相环、PI环节和额外的电压幅值同步控制环节,实现在离网时自动补偿缺额功率,使VSG与电网的相位同步,保证离网向并网的平滑切换。VSG并网后,所提预同步单元的频率补偿值 $\Delta\omega$ 自动归0,因此不需要在并网瞬间切除预同步单元,在非计划性并网时预同步单元无法快速切除情况下,使用本文方案,提高了VSG并网切换的稳定性。本文从原理上消除无锁相环预同步方案必须保持电网电压与VSG输出电压相位幅值一致的前提,扩大其适应范围。最后,在仿真和2 kW小功率实验平台中验证了所提策略的有效性。

参考文献

- [1] FANG J, LI H, TANG Y, et al. On the inertia of future more-electronics power systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(4): 2130–2146.
- [2] 刘辉,于思奇,孙大卫,等.构网型变流器控制技术及原理综述[J].中国电机工程学报,2025,45(1):277–297.
LIU Hui, YU Siqi, SUN Dawei, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 277–297.
- [3] 钟庆昌.虚拟同步机与自主电力系统[J].中国电机工程学报,2017,37(2):336–348.
ZHONG Qingchang. Virtual synchronizer and autonomous power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336–348.
- [4] TAO L, SUN J J, TAN Z, et al. Speed-sensorless and motor parameters-free starting method for large capacity synchronous machines based on virtual synchronous generator technology[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(8): 6607–6618.
- [5] CHEN J R, O'DONNELL T. Parameter constraints for virtual synchronous generator considering stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2479–2481.
- [6] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259–1267.
- [7] 迟永宁,江炳蔚,胡家兵,等.构网型变流器:物理本质与特征[J].高电压技术,2024,50(2):590–604.
CHI Yongning, JIANG Bingwei, HU Jiabing, et al. Grid-forming converters: physical mechanism and characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 590–604.
- [8] STRUNZ K, ALMUNEM K, WULKOW C, et al. Enabling 100% renewable power systems through power electronic grid-forming converter and control: system integration for security, stability, and application to Europe[J]. Proceedings of the IEEE, 2023, 111(7): 891–915.
- [9] MAHMOUD K, ASTERO P, PELTONIEMI P, et al. Promising grid-forming VSC control schemes toward sustainable power systems: comprehensive review and perspectives[J]. IEEE Access, 2022, 10: 130024–130039.
- [10] 吕志鹏,盛万兴,钟庆昌,等.虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2591–2603.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591–2603.
- [11] 杨亮,王聪,吕志鹏,等.基于同步逆变器的预同步并网方式[J].电网技术,2014,38(11):3103–3108.
YANG Liang, WANG Cong, LÜ Zhipeng, et al. The method of pre-synchronized grid connection of synchronverter[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3103–3108.
- [12] 魏亚龙,张辉,孙凯,等.基于虚拟功率的虚拟同步发电机预同步方法[J].电力系统自动化,2016,40(12):124–129.
WEI Yalong, ZHANG Hui, SUN Kai, et al. Pre-synchronization method of virtual synchronous generator using virtual power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 124–129.
- [13] AMIN M, ZHONG Q C. Resynchronization of distributed generation based on the universal droop controller for seamless transfer between operation modes[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(9): 7574–7582.
- [14] 程煜,李先允,程爽,等.基于虚拟阻抗的改进VSG预同步模型[J].电气自动化,2024,46(4):96–99.
CHENG Yu, LI Xianyun, CHENG Shuang, et al. Improved VSG pre-synchronization model based on virtual impedance[J]. Electrical Automation, 2024, 46(4): 96–99.
- [15] 吴丹丹,葛强,徐金,等.基于虚拟功率的VSG并网控制策略[J].江苏大学学报(自然科学版),2022,43(4):458–463.
WU Dandan, GE Qiang, XU Jin, et al. Grid-connected control strategy of virtual synchronous generator based on virtual power[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2022, 43(4): 458–463.
- [16] 柴秀慧,张纯江,杨春来,等.基于虚拟功率的虚拟同步发电机预同步控制策略[J].电力电子技术,2022,56(5):38–40.
CHAI Xiuhui, ZHANG Chunjiang, YANG Chunlai, et al. Pre-synchronous control strategy of virtual synchronous generator based on virtual power[J]. Power Electronics, 2022, 56(5): 38–40.

收稿日期:2025-03-17
修改稿日期:2025-05-23